第43卷 第2期
2023年4月
桂林电子科技大学学报
Journal of Guilin University of Electronic Technology
Vol. 43, No. 2
Apr. 2023

基于彩色 QR 码的信息无损提取隐藏算法

陈元枝，李志茹，姜文英，张维纳

（桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院，广西 桂林 541004）

摘　要：针对当前信息隐藏算法中秘密图像大多是信息量较小的二值图像或灰度图像，提取的秘密图像是有损的等问题，提出一种适用于较大编码容量的彩色 QR 码的无损提取信息隐藏算法。该算法先对载体图像三通道分解，将三分量分为 4×8 互不重叠的块，通过 DCT 变换获得分块的低频分量；彩色 QR 码通过 Arnold 置乱后，采用 Logistic 映射加密，将加密彩色 QR 码三通道分解，隐藏于彩色载体图像相应分块的低频分量中，并对 DCT 隐藏算法中由数据类型转换产生的舍入误差进行隐藏，在秘密图像提取过程中用于误差补偿。实验结果表明，该算法有效地完成了彩色 QR 码的加密隐藏与无损提取，具有较好的不可见性及安全性，该法亦适用于普通彩色秘密图像。

关键词：信息隐藏；图像加密；Arnold 置乱；Logistic 映射；DCT；无损提取；舍入误差

中图分类号：TP391.9　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-808X(2023)02-0087-07

Lossless information extraction and hiding algorithm based on color QR code

CHEN Yuanzhi, LI Zhiru, JIANG Wenying, ZHANG Weina

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In the current information hiding algorithms, most of the secret images are binary images or gray-scale images, and the extracted secret images are not lossless. A lossless information hiding algorithm for color QR codes with large coding capacity is proposed. Firstly, the carrier image is decomposed into three channels, then each channel is divided into blocks separately. The low-frequency components of the block areas are obtained by DCT transformation. Color QR code is scrambled by Arnold, and then encrypted by Logistic mapping, the three channels of encrypted color QR code are hidden in the low-frequency components of corresponding channel blocks of color carrier image. The rounding errors caused by data type transformation in the process of DCT hiding algorithm is hidden, which are used for data compensation in the process of secret image extraction. The experimental results show that the algorithm can effectively complete the hidden and lossless extraction of color QR code and common color secret image, and has good invisibility and security.

Key words: information hiding; image encryption; Arnold scrambling; Logistic mapping; DCT; lossless extraction; rounding error

随着互联网的迅猛发展，信息安全问题随之被重视。信息隐藏技术是将秘密信息不可见地隐藏于载体图像中，非目标用户难以从载密图像中判断秘密信息的存在，从而降低载密图像被拦截的可能。信息隐藏术涉及军事、医学、机密信息通信等领域，是当前研究的热点[1-2]。

文献[3]通过压缩载体图像的最低有效位（least significant bit，简称 LSB）获取秘密信息的隐藏空间，在最低有效位中隐藏秘密信息。LSB 的压缩率越高，信息隐藏容量越大。文献[4]通过对灰度载体图像 Contourlet 变换获得低频分量，再对低频系数进行奇异值分解，将二值图像信息嵌入载体图像的奇异矩阵中，具有较强的鲁棒性。文献[5]先对灰度秘密图像混沌加密和整数变换，将秘密信息隐藏于载体图像的最低有效位，实现了灰度图像在空间域的无损恢复。文献[6]对载体图像分别进行 IWT、DWT 变换，

收稿日期：2021-01-04
基金项目：广西自动检测技术与仪器重点实验室基金（YQ20106）
通信作者：姜文英（1971－），女，博士，研究方向为信息处理技术和应用。E-mail：jiangwy@guet.edu.cn
引文格式：陈元枝，李志茹，姜文英．基于彩色 QR 码的信息无损提取隐藏算法[J]．桂林电子科技大学学报，2023，43(2)：87-93.

获得载体的低频分量,并计算低频分量的奇异值,将灰度秘密图像信息嵌入奇异值中,提取的秘密图像归一化相关系数(NC)为0.996,但并未实现灰度图像的无损提取。赵丽红等[7]将9/7提升小波变换与SVD相结合的算法应用于彩色水印嵌入彩色图像中,先对彩色载体图像各通道进行三级提升小波变换,获得低频信息,再对彩色水印分通道置乱加密,将加密水印分嵌入载体图像低频信息中。该算法提取的彩色水印图像完整度较高,算法运行速率较快,NC值为0.996 13,有肉眼可见的信息损耗。快速响应二维码(quick response code,简称QR码),可将秘密信息编码为QR码图像,将QR码图像作为秘密图像隐藏。文献[8]将彩色载体图像由RGB空间转换到YC_rC_b空间,对载体图像Y分量采用DWT-DCT-SVD变换,获得的低频分量作为隐藏空间,将加密的黑白QR码隐藏于Y分量的低频分量中,载密图像的峰值信噪比和提取的黑白QR码图像NC分别在30、0.98以上,有较好的不可见性和鲁棒性。文献[9-11]以彩色QR码作为秘密图像,经Arnold置乱后,利用频域信息隐藏技术,完成对秘密图像的隐藏和提取,虽有较高的鲁棒性,但提取的秘密图像并非无损,且此处的彩色QR码未采用多种色彩进行信息编码,编解码及容量等方面与黑白QR码相同,只提升了视觉美感,故提取的秘密图像在色彩及细节方面要求较低。文献[12]采用k种颜色进行编码的彩色QR码技术,通过色块与预设颜色表的映射实现编解码,大幅度扩充了数据编码容量,将其作为秘密图像隐藏于彩色载体图像,可扩大信息隐藏容量。因为彩色QR码技术还未完全成熟,解码时对彩色QR码图像完整度和色彩准确度要求较高[13],所以,提取彩色QR码图像时,需要精准还原色彩及细节信息,实现彩色QR码的无损提取。目前彩色QR码较多应用于屏幕信息通信,以彩色QR码为介质,传递大容量信息,如图像、音频、文本等信息的传输存储[14]。

综上所述,目前研究主要以二值图像或灰度图像作为机密信息进行隐藏,但因彩色秘密图像可表征的信息量较大,对彩色秘密图像隐藏的研究还不够成熟。鉴于此,为提升信息隐藏容量,实现彩色QR码的不可见性隐藏与无损提取,提出一种基于彩色QR码的信息无损提取隐藏算法。该算法也适用于普通彩色秘密图像。

1 彩色QR码置乱加密

1.1 彩色QR码

传统2色二维QR码通常为黑白二维码,单位模块只携带1位二进制数,通常“0”代表浅色,“1”代表深色。例如,将信息序列“1001 0011”进行存储,黑白二维码需占8个单位模块。陈元枝等[13]提出的彩色QR码技术,通过增加颜色编码大幅度扩充了数据容量。若单位模块携带2位二进制数,则排列组合可代表4种不同的色彩。若采用4色,每2位转化为16进制数:10为2,01为1,00为0,11为3,则信息编码占4个单位模块;若用16色编码,则每4位转化为16进制数:1001为9,0011为3,信息编码只需占2个单位模块。编码色彩数量选2^k种,同版本同纠错级数条件下,该彩色QR码的信息编码量是传统2色QR码的k倍,较大程度扩大了数据容量。4色彩色QR码与2色黑白QR码,40-L版本数据容量对比如表1所示。

表1 4色彩色QR码与黑白QR码40-L版数据容量 bit

编码模式	彩色QR码[15]	黑白QR码
字母数字模式	8 594	4 296
中国汉字模式	3 636	1 817
8位字节模式	5 909	2 953

由表1可知,4色彩色QR码的数据容量是黑白QR码的2倍;16色彩色QR码的数据容量是黑白QR码的4倍,数据容量大幅度提升。在脱离网络情况下,可利用彩色QR码存储和读取大容量信息,减小信息存储空间。

1.2 Arnold变换

Arnold变换[16]是经典的图像置乱方法,二维图像置乱方程如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & b \\ a & ab+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} (b \bmod N), \quad (1)$$

其中:x、y为像素位置的原坐标,x、$y\in\{0,1,\cdots,N-1\}$;x'、y'为变换以后像素位置的坐标,x'、$y'\in\{0,1,\cdots,N-1\}$;N为图像矩阵的阶数;a、b均为除0以外的自然数。有限数据集进行Arnold变换,具有规律性、周期性、稳定性的特点。由于图像像素是有限集,图像经过T_N次置乱以后,像素会回到初始位置,且置乱的周期T_N与图像矩阵的阶数N有关。因此,a、b及置乱次数n可作为图像置乱因子,对图像的像素位置进行置乱加密。

1.3 Logistic映射

Logistic映射也称为虫口模型[17],Logistic映射为

$$X_{N+1}=\mu X_N(1-X_N), \quad (2)$$

混沌映射产生的序列与可变参数 μ 息息相关。当系统的可变参数 $\mu \in (3.5699, 4)$,初值 $X_0 \in (0,1)$,Logistic 映射进入混沌状态,产生的序列 X_N 具有非周期性、伪随机性、不收敛性、敏感性。μ、X_0 发生微小变化时,得到的新序列与初值改变前产生的序列差别极大,可将 μ、X_0 作为混沌加密因子。由于 Logistic 映射产生的序列 $X_N \in (0,1)$,秘密图像灰度值是[0,255]范围内的正整数,需对混沌序列 X_N 进行归一化、规范化处理,将混沌序列 X_N 映射于[0,255],并与图像各分量灰度值进行异或逻辑运算,实现对图像的灰度值加密。

1.4　秘密图像置乱加密方法

Arnold 变换可对图像像素位置进行置乱,但 Arnold 变换具有周期性,经置乱加密的图像安全性较弱。为提高秘密图像的安全性,通过 Arnold 变换对秘密图像进行像素位置置乱,再采用 Logistic 映射进行混沌加密,加密结果完全看不出原始图像的纹理结构,并规避了 Arnold 周期性带来的不足,进一步增强了秘密图像的安全性。图像置乱加密流程如图 1 所示。

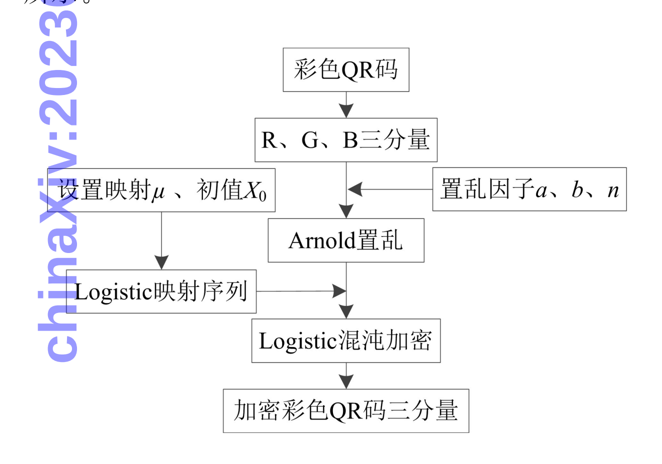


图 1　秘密图像置乱加密流程

2　彩色载体图像处理

2.1　离散余弦变换

离散余弦变换(discrete cosine transform,简称 DCT)是一种实数域变换,可以将数字图像中像素的特性在频域展现出来,其变换核为实数的余弦函数。对图像进行二维 DCT,可将图像的主要可视信息集中在 DCT 变换的低频分量中[18],在图像的低频成分中隐藏水印有较高的鲁棒性。一个 $M\times N$ 的二维数字图像 $\boldsymbol{A}$,DCT 表达式为

$$\boldsymbol{B}_{pq}=a_p a_q \sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}\boldsymbol{A}_{mn}\cos\frac{\pi(2m+1)p}{2M}\times \cos\frac{\pi(2n+1)q}{2N}, \tag{3}$$

其中:$\boldsymbol{B}_{pq}$ 为 $\boldsymbol{A}$ 的 DCT 系数矩阵;p、q 为频域的采样坐标,$0\leqslant p\leqslant M-1$,$0\leqslant q\leqslant N-1$;$m$、$n$ 为图像时域像素坐标。

$$\begin{cases} a_p=\begin{cases}\dfrac{1}{\sqrt{M}}, p=0,\\ \sqrt{\dfrac{2}{M}}, 1\leqslant p\leqslant M-1,\end{cases}\\ a_q=\begin{cases}\dfrac{1}{\sqrt{N}}, q=0,\\ \sqrt{\dfrac{2}{N}}, 1\leqslant q\leqslant N-1。\end{cases}\end{cases} \tag{4}$$

逆 DCT 变换公式为

$$\boldsymbol{A}_{mn}=\sum_{p=0}^{M-1}\sum_{q=0}^{N-1}a_p a_q \boldsymbol{B}_{pq}\cos\frac{\pi(2m+1)p}{2M}\times \cos\frac{\pi(2n+1)q}{2N}, \tag{5}$$

其中:$\boldsymbol{A}_{mn}$ 为逆 DCT 获得的时域图像矩阵,$0\leqslant m\leqslant M-1$,$0\leqslant n\leqslant N-1$。当 $p=0$,$q=0$ 时,DCT 变换获得的频域系数与余弦函数无关,该频域系数是图像抽样信号的均值,也是 DCT 变换的直流分量,被称为 DCT 变换的直流系数[18]。

由于 DCT 变换为浮点型变换,隐藏秘密信息的 DCT 系数矩阵经逆 DCT 变换,获得浮点型载密矩阵,而图像在保存显示时的数据类型为 uint8 整型,浮点型载密矩阵需转化为整型矩阵,数据类型转换将产生四舍五入误差。经过仿真实验,从载密图像中提取秘密图像时,该舍入误差会造成秘密图像颜色失真并产生噪点,仿真效果图如图 2 所示。

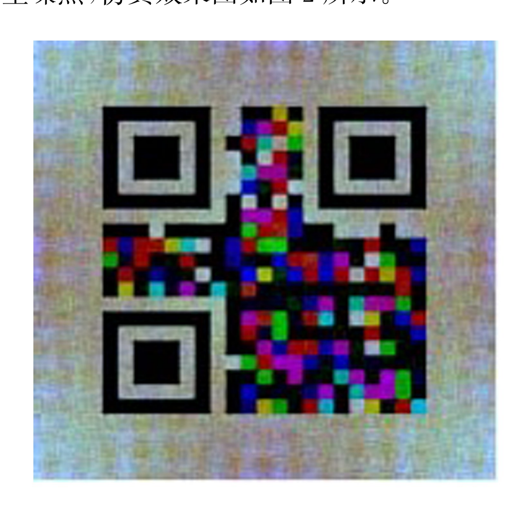


图 2　舍入误差引起的提取图失真

为实现彩色 QR 码的加密隐藏及无损提取，提出基于彩色 QR 码信息无损提取隐藏算法。该法首先将秘密图像灰度值隐藏于载体图像中，统计载密矩阵在数据类型转换中产生的舍入误差，并将舍入误差隐藏于载体图像中。从载密图像中提取秘密图像前，先提取舍入误差数据信息，对载密图像灰度值隐藏区进行舍入误差补偿后，再提取精确的秘密图像信息。经多次仿真实验，隐藏舍入误差小数点后 3 位信息，可实现秘密图像的无损提取，误差信息有正负之分，也需对误差正负标记位隐藏。

2.2 载体图像分块

根据对舍入误差的数据分析，彩色 QR 码灰度值的隐藏需要 1 个信息隐藏区，隐藏舍入误差小数点后 3 位及误差正负标记位需 4 个隐藏区，故每个分块共有 5 个隐藏区；

在彩色 QR 码隐藏之前，先对载体图像进行分块预处理。对载体图像分块的具体步骤如下：

1)对载体图像 $\boldsymbol{C}$ 进行三通道分解，获得载体 R、G、B 分量 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r}}$、$\boldsymbol{C}^{\mathrm{g}}$、$\boldsymbol{C}^{\mathrm{b}}$；

2)以 R 通道为例，根据彩色 QR 码图像的行 k、列 l，将载体图像三分量分别分为 $k\times l$ 个互不重叠的 4×8 的分块 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r}}_{1,1},\boldsymbol{C}^{\mathrm{r}}_{1,2},\cdots,\boldsymbol{C}^{\mathrm{r}}_{i,j}$，再将分块 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r}}_{i,j}$ 细分为 1 个 4×4 的分块 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},0}_{i,j}$，4 个 2×2 的分块 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},1}_{i,j}$，$\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},2}_{i,j}$，$\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},3}_{i,j}$，$\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},4}_{i,j}$。其中分块 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},0}_{i,j}$ 用来隐藏灰度值信息，分块 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},1}_{i,j}$ 隐藏舍入误差的正负标记位，分块 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},2}_{i,j}$，$\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},3}_{i,j}$，$\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},4}_{i,j}$ 各隐藏一位舍入误差信息。

载体图像分块示意图如图 3 所示。

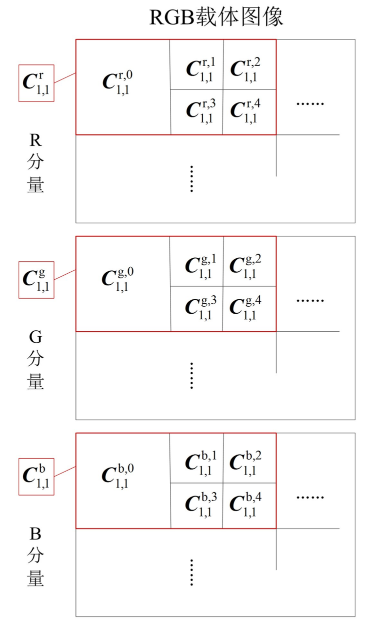


图 3 载体图像分块示意图

3 彩色 QR 码图像的隐藏和提取

3.1 彩色 QR 码的隐藏

为扩大 DCT 域信息隐藏容量，将秘密信息通过编码存储于彩色 QR 码图像。以彩色 QR 码图像为秘密图像，隐藏于载体图像中，实现秘密信息的隐秘传输，基于彩色 QR 码的信息无损提取隐藏算法具体步骤如下，以 R 通道为例阐述：

1)将秘密信息输入彩色 QR 码编/解码生成系统，生成存储秘密信息的彩色 QR 码图片，依据图 1 加密流程图实现对彩色 QR 码图像加密。

2)载体图像分块。

3)依次取分块 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},0}_{i,j},\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},2}_{i,j},\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},3}_{i,j},\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},4}_{i,j}$ 进行二维 DCT，生成矩阵 $\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},0}_{i,j},\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},2}_{i,j},\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},3}_{i,j},\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},4}_{i,j}$。将 $\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},0}_{i,j}$ 的直流系数作为彩色 QR 码的灰度值信息隐藏区域。根据加权嵌入公式

$$\bar{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{r},0}_{i,j}=\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},0}_{i,j}-\alpha\boldsymbol{S}^{\mathrm{r}}_{i,j}\,,\tag{6}$$

依次将彩色 QR 码 R 分量的灰度值信息隐藏于载体图像 R 分量的分块 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},0}_{i,j}$，生成 $\bar{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{r},0}_{i,j}$ 矩阵。其中：$\boldsymbol{S}^{\mathrm{r}}_{i,j}$ 是彩色 QR 码 R 分量的第 i 行、第 j 列的灰度值；α 为加权因子，可根据隐藏情况而定；

4)对 $\bar{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{r},0}_{i,j}$ 矩阵进行逆二维 DCT，生成含有彩色 QR 码信息的矩阵 $\boldsymbol{W}^{\mathrm{r},0}_{i,j}$；

5)通过误差计算公式

$$\boldsymbol{e}^{\mathrm{r}}_{i,j}=\boldsymbol{W}^{\mathrm{r},0}_{i,j}-\mathrm{round}(\boldsymbol{W}^{\mathrm{r},0}_{i,j})\,,\tag{7}$$

计算矩阵 $\boldsymbol{W}^{\mathrm{r},0}_{i,j}$ 数据类型转换产生的舍入误差，取误差小数点后 3 位，生成舍入误差矩阵 $\boldsymbol{e}^{\mathrm{r}}_{i,j}$；

6)采用误差正负标记位隐藏公式

$$\boldsymbol{F}^{\mathrm{r},1}_{i,j}(n,n)=\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},1}_{i,j}(n,n)+f\,,\tag{8}$$

将误差正负标记位 f 隐藏在 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{r},1}_{i,j}$ 矩阵中，生成矩阵 $\boldsymbol{F}^{\mathrm{r},1}_{i,j}$，其中 $1\leqslant n\leqslant 2$；

7)将步骤 5)中的舍入误差 $\boldsymbol{e}^{\mathrm{r}}_{i,j}$ 依次按位取出，分别根据舍入误差加权嵌入公式：

$$\bar{\boldsymbol{E}}^{\mathrm{r},2}_{i,j}=\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},2}_{i,j}-\beta\boldsymbol{e}^{\mathrm{r},1}_{i,j}\,,\tag{9}$$

$$\bar{\boldsymbol{E}}^{\mathrm{r},3}_{i,j}=\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},3}_{i,j}-\beta\boldsymbol{e}^{\mathrm{r},2}_{i,j}\,,\tag{10}$$

$$\bar{\boldsymbol{E}}^{\mathrm{r},4}_{i,j}=\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},4}_{i,j}-\beta\boldsymbol{e}^{\mathrm{r},3}_{i,j}\,,\tag{11}$$

将舍入误差的每位依次隐藏于步骤 3)的矩阵 $\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},2}_{i,j}$，$\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},3}_{i,j},\bar{\boldsymbol{C}}^{\mathrm{r},4}_{i,j}$ 的直流分量中，其中 β 为误差加权嵌入因子，经验值 $\beta\in[1.6,2]$；

8)对 $\bar{\boldsymbol{E}}^{\mathrm{r},2}_{i,j},\bar{\boldsymbol{E}}^{\mathrm{r},3}_{i,j},\bar{\boldsymbol{E}}^{\mathrm{r},4}_{i,j}$ 进行逆 DCT 变换，得到隐藏彩色 QR 码的载密图像的 R 分量 $\boldsymbol{W}^{\mathrm{r}}$，依次完成 G、B 通道的隐藏，将载密三分量合并，得 RGB 载密图像 $\boldsymbol{W}$。

彩色 QR 码隐藏流程如图 4 所示。

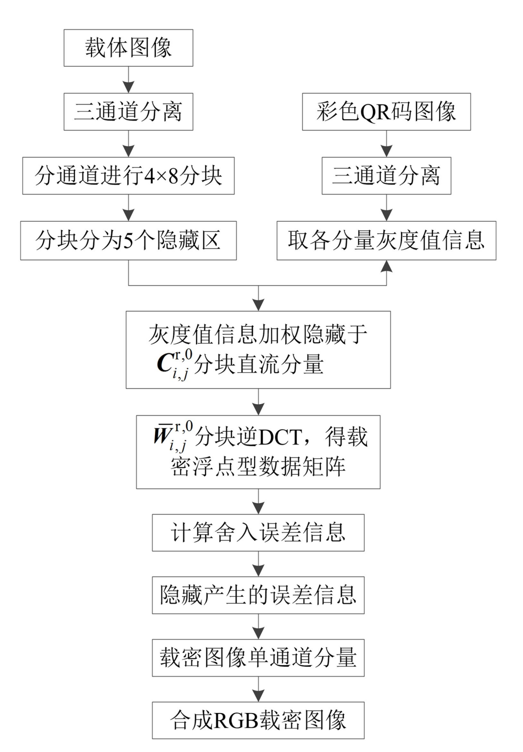


图 4　彩色 QR 码隐藏流程

3.2　彩色 QR 码的提取

从载密图像中提取彩秘密图像的过程是嵌入过程的逆过程，彩色 QR 码的提取步骤如下：

1)将载密图像 $\boldsymbol{W}$ 与原载体图像 $\boldsymbol{C}$ 分别进行 R、G、B 三通道分解；

2)分别取载密图像和载体图像隐藏误差正负标记位的分块，相减生成误差标记位 f；

3)对隐藏误差的分块进行 DCT 变换，根据舍入误差提取公式提取舍入误差信息，以提取误差的第 1 位为例：

$$e_{i,j}^{r,1}=(\bar{C}_{i,j}^{r,2}-\bar{E}_{i,j}^{r,2})/\beta, \tag{12}$$

β 同隐藏情况，依次取舍入误差的第 2 位和第 3 位，根据误差正负标记位 f，得最终的舍入误差 $e_{i,j}^{r}$；

4)采用舍入误差补偿公式

$$W_{i,j}^{r,0}=W_{i,j}^{r,0}+e_{i,j}^{r}, \tag{13}$$

对载密图像隐藏灰度值信息的分块 $W_{i,j}^{r,0}$ 误差数据进行补偿，再进行 DCT 变换，生成矩阵 $\bar{W}_{i,j}^{r,0}$；采用彩色 QR 码图像提取公式

$$\hat{S}_{i,j}^{r}=(\bar{W}_{i,j}^{r,0}-\bar{C}_{i,j}^{r,0})/\alpha, \tag{14}$$

提取精确的彩色 QR 码图像数据矩阵 $\hat{S}_{i,j}^{r}$。

5)将提取的彩色 QR 码图像数据矩阵 $\hat{S}_{i,j}^{r}$ 由浮点型转化为 uint8 整型 $\hat{S}_{i,j}^{r}$，依次完成 G、B 通道的信息提取，将提取的秘密信息各分量合并生成彩色 QR 码 $\hat{S}$，利用彩色 QR 码系统解码。

彩色 QR 码无损提取流程如图 5 所示。

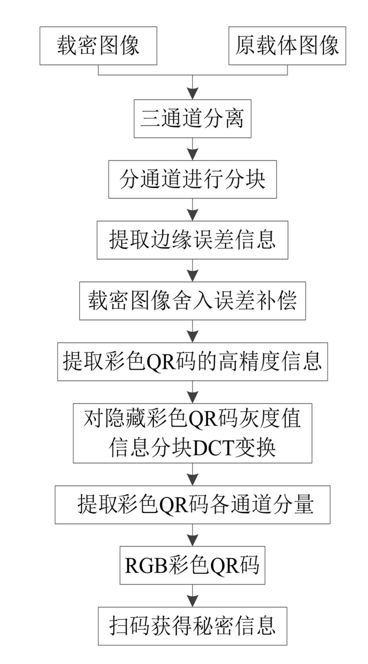


图 5　彩色 QR 码无损提取流程

4　实验结果分析

4.1　实验结果评价标准

1)用峰值信噪比(PSNR)评价载密图像的失真程度，失真程度越小，算法的不可见性越强[19]。RGB 图像的 PSNR 为

$$R_{\mathrm{PSN}}=10\lg\frac{255^2\times 3}{E_{\mathrm{MS,R}}+E_{\mathrm{MS,G}}+E_{\mathrm{MS,B}}}, \tag{15}$$

E_{MS} 表示载体图像与载密图像之间的均方差，均方差为

$$E_{\mathrm{MS}}=\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}[x'(i,j)-x'(i,j)]^2, \tag{16}$$

其中：$x(i,j)$ 为原载体图像的像素值；$x'(i,j)$ 为载密图像的像素值。

2)提取的秘密图像与原秘密图像之间的相似性通过归一化相关系数(NC)来衡量，表达式为

$$C=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}g(i,j)g'(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1,j=1}^{i=m,j=n}g(i,j)^2}\sqrt{\sum_{i=1,j=1}^{i=m,j=n}g'(i,j)^2}}, \tag{17}$$

其中：m、n 分别为秘密图像的长、宽；$g(i,j)$ 为原秘密图像灰度值；$g'(i,j)$ 为提取出的秘密图像灰度值。NC 值范围为[0,1]，其值越接近 1，其效果越接近于原始秘密图像[20]。

3)结构相似性指数(structual similarity index,简称 SSIM)是适合人类眼睛观感的评价图像相似程度的指标[21],其通过计算两幅图在亮度、对比度和结构方面的测量估计,从而推导出两幅图的相似程度。I_{SSIM} 值范围在[0,1],当两幅图片相似度越高,I_{SSIM} 越接近于 1。I_{SSIM} 计算表达式为

$$I_{\mathrm{SSIM}}(X,Y)=\frac{(2\mu_X\mu_Y+C_1)(2\sigma_{XY}+C_2)}{(\mu_X^2+\mu_X^2+C_1)(\sigma_X^2+\sigma_X^2+C_3)},\tag{18}$$

其中:X、Y 分别为两幅相比的图像;μ_X、μ_Y 分别为图像 X、Y 的灰度值均值;σ_X、σ_Y 分别为图像 X、Y 的方差;σ_{XY} 为两幅图像的协方差;C_1、C_2、C_3 为常数,保证分母不为 0。

4.2 实验结果及分析

实验仿真环境为 Windows 7 系统,用 MTALAB R2014a 软件进行仿真。为验证该算法不仅适用于彩色 QR 码的隐藏与无损提取,亦适用于普通彩色秘密图像,选取像素为 2 400×2 400 的 RGB 载体图像 lena 和 baboon,像素为 300×300 的 RGB 秘密图像彩色 QR 码和 apple。彩色 QR 码所携带信息为“桂林电子科技大学”。取置乱因子 $a=3$,$b=5$,置乱次数 $n=16$,对秘密图像 Arnold 置乱,再取 $\mu=3.62$,$X_0=0.91$ 进行混沌加密。取隐藏因子 $\alpha=0.08$,$\beta=2$,对置乱加密的秘密图像进行隐藏与提取实验。

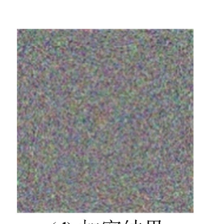
4.2.1 未受攻击的实验结果

图 6 为彩色 QR 码经加密隐藏于载体图像 lena 的实验结果,图 7 为普通彩色秘密图像 apple 经加密隐藏于载体图像 baboon 的实验结果。

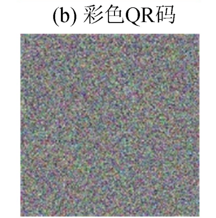

(a) 载体图像lena

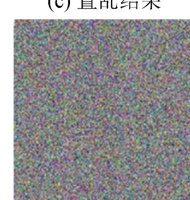
(b) 彩色QR码

(c) 置乱结果


(d) 加密结果

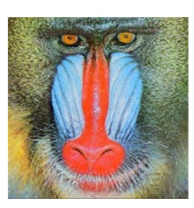
(e) lena-彩色QR码


(f) 提取结果

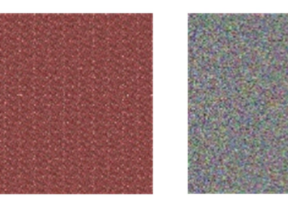

(g) 错误密钥解密

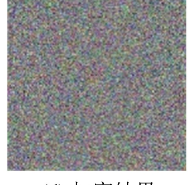
(h) 解密结果

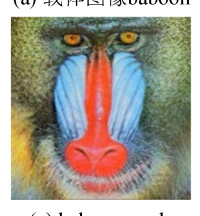
图 6 彩色 QR 码隐藏于 lena 实验结果

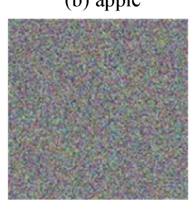

(a) 载体图像baboon

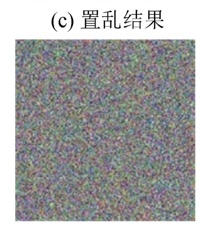

(b) apple


(c) 置乱结果


(d) 加密结果


(e) baboon-apple


(f) 提取结果


(g) 错误密钥解密


(h) 解密结果

图 7 apple 隐藏于 baboon 实验结果

对图 6、7 中仿真结果进行测试,计算载密图像的 PSNR、提取图像的 NC 及 SSIM。载密图像 lena-彩色 QR 码的 PSNR 值为 44.794 5,提取的彩色 QR 码图像的 NC 值为 1,SSIM 值为 1;载密图像的 baboon-apple 的 PSNR 值为 43.629 2,提取的 apple 图像的 NC 值为 1,SSIM 值为 1。这说明该算法可不可见地

隐藏并无损提取彩色秘密图像,完整地还原了秘密图像的细节及色彩信息。输入错误的密钥时,不能解密加密的秘密图像,表明该算法有较好的安全性。

4.2.2　受攻击的实验结果

分别对载密图像 lena-彩色 QR 码、baboon-apple 添加白噪声,剪切攻击,旋转 10°攻击,椒盐噪声攻击,分别计算载密图像受攻击后提取的秘密图像的 NC 值,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,该算法对于高斯白噪声和旋转攻击鲁棒性较弱,对剪切攻击和椒盐噪声攻具有一定的鲁棒性,提取秘密图像 NC 值保持在 0.95 以上。

表 2　提取的彩色 QR 码及 apple 图像的 NC 值

攻击方式	彩色 QR 码	apple
高斯白噪声	0.734 0	0.703 9
剪切 1/16 攻击	0.998 2	0.999 6
剪切 1/8 攻击	0.995 2	0.999 1
旋转 10°	0.862 1	0.836 6
椒盐噪声 0.01	0.959 9	0.963 6
椒盐噪声 0.02	0.950 1	0.958 7

5　结束语

提出了一种基于彩色 QR 码信息无损提取的隐藏算法。将秘密信息编码生成彩色 QR 码图像隐藏于载体图像中,扩大了 DCT 域信息隐藏容量。利用 Arnold 变换及 logistic 映射,增强彩色 QR 码图像的安全性;对 DCT 信息隐藏产生的舍入误差进行隐藏,无攻击情况下,载密图像 PSNR 大于 43.62,提取的彩色秘密图像 NC 值为 1,SSIM 值为 1,实现了彩色 QR 码图像的无损提取,可正确还原彩色 QR 码的细节和色彩信息。该算法亦适用于普通彩色秘密图像的隐藏与无损提取,为彩色秘密图像的隐藏与客观验证提供了新思路。该算法对于剪切攻击和椒盐噪声攻击具有一定的鲁棒性,但对高斯白噪声及旋转攻击鲁棒性较弱,下一步需提高算法的鲁棒性。

参考文献:

[1] 王丽娜,张焕国.信息隐藏技术与应用[M].2 版.武汉:武汉大学出版社,2009:73-75.

[2] GE X,LU B,LIU F L,et al. An image encryption algorithm based on information hiding[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos,2016,26(11):2129-2151.

[3] ZHANG X P. Separable reversible data hiding in encrypted image[J]. IEEE Signal Processing Letters,2012,7(4):826-832.

[4] 肖振久,李南,王永滨,等.基于 Contourlet 奇异值分解的强鲁棒数字水印算法[J].计算机工程,2016,42(9):138-143.

[5] 田慧明,吴成茂,田小平.基于混沌理论和整数变换的可逆信息隐藏[J].计算机工程与应用,2019,55(12):194-201.

[6] GUPTA P,PARMAR G. Image watermarking using IWT-SVD and its comparative analysis with DWT-SVD[C]//International Conference on Computer,Communications and Electronics. Piscataway,NJ:IEEE Press,2017:527-531.

[7] 赵丽红,王永军,王佳禾.双正交提升小波和奇异值分解的彩色水印算法研究[J].计算机应用研究,2014,31(2):568-570.

[8] 沈艳冰,杨阳,李竹.一种适用于 QR 码的彩色图像数字水印算法[J].智能系统学报,2020,15(5):949-955.

[9] 王晓红,孙业强.基于 QR 分解的强鲁棒性双彩色盲水印算法[J].光电子•激光,2017,28(9):1016-1024.

[10] 王子煜,孙刘杰,李孟涛.强鲁棒性 QR 码水印技术[J].包装工程,2012,33(15):84-87.

[11] 魏代海,王晓红,刘玄玄.一种强鲁棒性的彩色图像数字水印技术[J].包装工程,2016,37(9):124-128.

[12] 陈元枝,邓艳,史绍亮,等.基于 Zxing 的彩色 QR 码生成与识别方法[J].桂林电子科技大学学报,2016,36(4):333-337.

[13] 卫皓茜.一种新型彩色二维码技术的研究与实现[D].上海:上海师范大学,2017:27-33.

[14] 王碧琪.基于彩色条码的屏幕通信系统研究与实现[D].北京:北方工业大学,2020:35-36.

[15] 陈元枝,邓艳,史绍亮,等.基于 Gzip 压缩算法的彩色 QR 码生成与识别方法[J].电子技术应用,2015,41(12):116-119.

[16] 李春虎,罗光春,李春豹.基于斜帐篷混沌映射和 Arnold 变换的图像加密方案[J].计算机应用研究,2018,35(11):3424-3427.

[17] LI T,HU J,CHI Z,et al. Image encryption algorithm based on arnold transformation and logistic mapping[J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences,2012,4(23):282-289.

[18] 王丽娜,郭迟,李鹏.信息隐藏技术实验教程[M].武汉:武汉大学出版社,2004:73-74.

[19] 季诺然,吕晓琪,谷宇,等.基于 QR 码与混沌加密的 Contourlet 域彩色图像盲水印算法[J].包装工程,2017,38(15):173-178.

[20] DUMITRESCU S,WU X,ZHE W. Detection of LSB steganography via sample pair analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2002,51(7):1995-2007.

[21] 王晓红,黄中秋,孙业强,等.一种抗打印扫描的双彩色 QR 码水印算法[J].包装工程,2018,39(3):211-216.

编辑:张所滨